

AEROSOLLES ATMOSFÉRICOS. RELEVANCIA EN EL CLIMA DEL PLANETA Y UN EXPERIMENTO DEMOSTRATIVO SOBRE SU FORMACIÓN EN LA INTERFAZ URBANO-FORESTAL

ATMOSPHERIC AEROSOLS. RELEVANCE IN THE PLANET'S CLIMATE AND A DEMONSTRATIVE EXPERIMENT ON ITS FORMATION IN THE URBAN-FOREST INTERFACE

Marco Antonio Mora-Ramírez^{1,*}
Jenaro Reyes-Matamoros²
Luis Alberto Rendón-Delgado³

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
¹Facultad de Ciencias Químicas, Av. San Claudio 1814, Edificio
FCQ 5, Jardines de San Manuel, 72570, Puebla, Pue., México

²Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, Av. 14 sur 6301,
Col. San Manuel, C. P. 72570, Puebla, Pue., México, e-mail: jenaro.
reyes@correo.buap.mx

³Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas, Av. San Claudio 1814,
Jardines de San Manuel, 72570, Puebla, Pue., México, e-mail: luis.
rendon@correo.buap.mx

M. A. Mora-Ramírez, e-mail: marco.morar@correo.buap.mx

Abstract

Atmospheric aerosols are particles suspended in the atmosphere that vary in origin, size, and composition. In addition to being dangerous to human health, atmospheric aerosols can have short- and long-term effects on climate dynamics and are considered one of the greatest sources of uncertainty in global climate prediction models. In this work, we make an introduction to the subject of atmospheric aerosols as a key element of climate change. Likewise, a demonstrative experiment we carried out in the university laboratory is presented to illustrate one of the possible chemical mechanisms of aerosol formation from biogenic emissions from forests and secondary pollutants from cities, knowing that this type of chemical reaction occurs in the forest environment or at the forest-city interface. We consider it important to spread this phenomenon since forest ecosystems are basically considered particle sinks when particles are deposited on the surface of plants and leaves due to the mechanical effects of the wind. However, it is less known that forests can emit elements that are precursors to forming atmospheric aerosols.

Keywords: Secondary aerosols, terpenes, biogenic emissions, atmospheric chemistry, urban-rural pollution.

Resumen

Los aerosoles atmosféricos son partículas suspendidas en la atmósfera y estas varían en origen, tamaño y composición. Además de ser peligrosos para la salud humana, los aerosoles atmosféricos pueden tener efectos a corto y largo plazo sobre la dinámica del clima, y son considerados una de las mayores fuentes de incertidumbre en los modelos de predicción del clima global. En este trabajo realizamos una introducción al tema de los aerosoles atmosféricos como elemento clave del cambio climático. Así mismo, se presenta un experimento demostrativo que realizamos en el laboratorio universitario de la BUAP para ilustrar uno de los posibles mecanismos químicos de formación de aerosoles a partir de emisiones biogénicas de los bosques y contaminantes secundarios de las ciudades, a sabiendas de que este tipo de reacciones químicas ocurren en el ambiente forestal, o en la interfaz forestal-ciudad. Consideramos importante difundir este fenómeno, ya que típicamente los ecosistemas forestales son considerados como sumideros de partículas cuando estas se depositan en la superficie de las plantas y hojas debido a efectos mecánicos del viento. Sin embargo, es menos conocido que los bosques pueden emitir elementos precursores de la formación de aerosoles atmosféricos.

Palabras clave: Aerosoles secundarios, terpenos, emisiones biogénicas, química atmosférica, contaminación urbana-rural.

¿Por qué estudiar a los aerosoles?

El cambio climático (CC) se relaciona con sequías y lluvias más frecuentes y de mayor intensidad, un aumento global de la temperatura promedio, frecuencia e intensidad de incendios y deshielo, entre otros temas. Así mismo, cuando se habla del tema de CC típicamente se relaciona con una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y en este contexto podría venir a nuestra memoria el dióxido de carbono (CO₂) y después quizá el metano (CH₄) como el que se genera en grandes cantidades en los tiraderos de basura. También, se habla todo el tiempo de ahorro de energía, eficiencia energética, implementación de tecnologías, y más recientemente de economía circular, como se muestra en el lado izquierdo de la figura 1. Pero los científicos en el mundo nos dicen que esto solo es una parte de la historia del problema del CC. Los aerosoles representan otra parte fundamental del problema, pero quizá mucho menos conocida. En el lado derecho de la figura 1 se muestran algunos temas asociados a los aerosoles y el sistema climático.

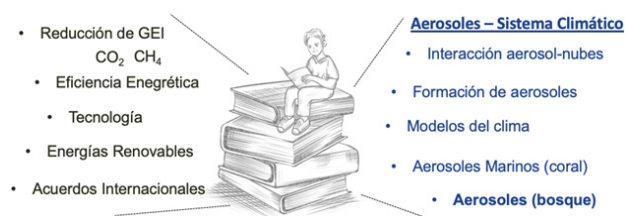


Figura 1. El problema del cambio climático se asocia a diversos temas (lado izquierdo) más o menos bien conocidos, sin embargo es poco conocido que los aerosoles (lado derecho) son una parte fundamental del problema del cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

Primero que todo, los aerosoles son partículas suspendidas en la atmósfera que tienen relevancia en el balance radiativo y el clima del planeta (Haywood, 2016; Miller & Tegen, 1998; Ramanathan, Crutzen, Kiehl, & Rosenfeld, 2001) y son un elemento clave en los procesos de formación de nubes (Bréon, Tanré, & Generoso, 2002) que se evidencia en los modelos climáticos donde la interacción de los aerosoles atmosféricos con las nubes es una de las mayores fuentes de incertidumbre en

las proyecciones climáticas (Lee, Reddington, & Carslaw, 2016). También, es bien sabido que los aerosoles atmosféricos afectan la calidad del aire (Che et al., 2015) y tienen consecuencias en la salud humana (Davidson, Phalen, & Solomon, 2005; Pöschl, 2005). Los aerosoles tienen una amplia gama de fuentes y pueden clasificarse de acuerdo a su origen como naturales (polvo, sal marina, humo, entre otros) y antropogénicos. Los aerosoles atmosféricos varían en tamaño desde unos pocos nanómetros, hasta decenas de micrómetros como el ancho (diámetro) de un cabello humano (Ehara, Hagwood, & Coakley, 1996). El tamaño de una partícula altera su comportamiento, incluido el tiempo que permanece suspendida en el aire (Jia, 2014) durante el cual pueden participar en reacciones químicas (Hallquist et al., 2009). La figura 2 muestra ejemplos de partículas con diferentes tamaños, algunas tan pequeñas como 0.001 micrómetros (0.0000001 m) y tan grandes como 100 o 200 micrómetros (0.0001m). Para poner esto en perspectiva, multiplicamos el tamaño por un factor de 1x10⁵ (100,000), entonces por ejemplo el virus de Zika reescalado, tendría un tamaño aproximado de un chícharo, el coronavirus tendría un tamaño de una pelota de golf, las partículas de humo de los incendios la estatura promedio de una persona, el polen entre 3 y 4 m y el cabello humano la altura de un edificio (30 m). Esto enfatiza la extensa variación de tamaños de las partículas que componen los aerosoles atmosféricos. ¡Hay cinco órdenes de magnitud de variación del tamaño!

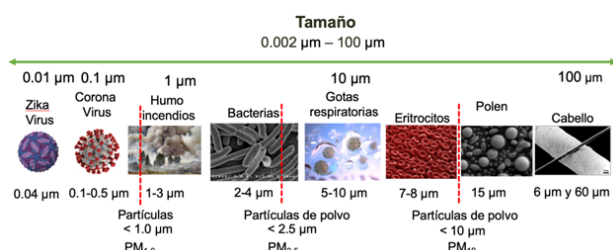


Figura 2. Variación del tamaño de las partículas de los aerosoles.

Fuente: Elaboración propia con base en diversas imágenes de la web: de izquierda a derecha Cápside del virus del Zika coloreada por cadenas. Fuente: Sirohi, D., Chen, Z., Sun, L., Klose, T., Pierson, T., Rossmann, M. and Kuhn, R. (2016). The 3.8Å resolution cryo-EM structure of Zika virus. DOI: 10.2210/pdb5ire/pdb disponible en: <http://www.rcsb.org/pdb/explore/explore.do?structureId=5IRE> [Consultada el 3 de abril de 2016] Imagen generada usando QuteMol y GIMP. Coronavirus, ilustración de Alissa Eckert, MS; Dan Higgins, MAMS / Center for Disease Control (CDC) de los Estados Unidos <https://phil.cdc.gov/Details.aspx?pid=23311>. El humo de los incendios forestales puede favorecer la propagación del coronavirus. (FOTO: DRI) <https://www.diariomedico.com/medicina/neumologia/politica/el-humo-de-los-incendios-forestales-favorece-la-propagacion-del-coronavirus.html>. Bacterias.

Cepas de *E. coli* resistentes a cefalosporinas (CR). / National Institute of Allergy and Infectious Diseases (NIAID)

<https://www.agenciasinc.es/Noticias/La-bacteria-E.-coli-aparece-en-cerdos-tratados-con-antibioticos-betalactamicos>. New coronavirus is known to be spread via large droplets that fall to the ground. But whether it can be spread by smaller airborne particles remains unclear. Credit: Getty Images

<https://www.scientificamerican.com/article/how-coronavirus-spreads-through-the-air-what-we-know-so-far1/>. Eritrocitos Image credit: "Jn7ws94a-2" by Annie Cavanagh is licensed under CC BY-SA 4.0), Polen

This work has been released into the public domain by its author, Dartmouth College Electron Microscope Facility[3]. This applies worldwide. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Misc_pollen.jpg, Carbon fiber compared with human hair (photo credit: Anton).Liu, Yue & Zwingmann, Bernd & Schlaich, Mike. (2015). Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures—A Review. *Polymers*. 7. 2078-2099. 10.3390/polym7101501.

También es importante comentar que las partículas que componen los aerosoles tienen diversas formas. Estas pueden tener formas esféricas, de cadenas, fibras como los microplásticos suspendidos en el aire, de gotas como las que generamos al respirar, de los

cristales provenientes de las emisiones de un volcán y las caprichosas e ingeniosas formas que presenta el polen.

Toda esta complejidad dificulta la predicción y el modelado de las propiedades de los aerosoles atmosféricos sub-micrométricos en el planeta son producidos por emisiones biogénicas de compuestos orgánicos volátiles (COV), estos compuestos que contienen carbón son emitidos por las plantas, bosques y en general de la naturaleza. Dentro de los COV emitidos encontramos principalmente el isopreno (C₅H₈) y monoterpenos y provienen principalmente de las plantas (Andreae & Crutzen, 1997; Surratt et al., 2006). Los aerosoles producidos a partir de la oxidación de COV son conocidos como aerosoles orgánicos secundarios (SOA, por sus siglas en inglés), y representan una fracción significativa de las partículas atmosféricas transportadas en el aire. Un caso particular de formación de SOA es cuando se tienen emisiones de las plantas (terpenos) y reaccionan químicamente con el O₃ que es un contaminante secundario. Este fenómeno puede ocurrir en el aire ambiente del dosel urbano que contiene O₃, y las emisiones provenientes de zonas forestales alrededor de las ciudades (Gao et al., 2022).

Los aerosoles y el calentamiento global

La diferencia entre la cantidad de energía que ingresa a la atmósfera de la Tierra y la que sale de ella se conoce como forzamiento radiativo. Este parámetro permite estimar la magnitud de una perturbación o factor climático sobre el balance de energía radiativa del sistema climático de la Tierra (Houghton et al., 1996). Entre los factores climáticos encontramos a los de origen antropogénico como los gases de efecto invernadero (GEI) y a los aerosoles, por otra parte, los factores de origen natural como la irradiancia solar. Para cada factor climático, se calculan los llamados valores de forzamiento para el período de tiempo entre 1750 y la actualidad. Un "forzamiento positivo" representa un factor climático que contribuye al calentamiento de la superficie terrestre, mientras que un "forzamiento negativo" es ejercido por factores climáticos que enfrían la superficie terrestre. La figura 3 muestra el forzamiento radiativo global de factores climáticos naturales (radiancia solar) y antropogé-

cos (GEI, aerosoles y otros) y señala el nivel de confianza de estos cálculos que se aprecia a través de las barras de error. Como es bien sabido, los GEI son factores que contribuyen al calentamiento del planeta, entre ellos el CO₂ tiene forzamiento radiativo global aproximado de +1.6 W m⁻², seguido por el metano (CH₄) y el ozono (O₃) de la parte de baja de la atmósfera (< 14 km) con forzamientos radiativos de +1.0 W m⁻² y +0.5 W m⁻² respectivamente. Nótese que todos estos valores tienen asociadas barras de error relativamente pequeñas; más pequeñas que el valor mismo. En contraste, los aerosoles contribuyen al enfriamiento del planeta con valores estimados de forzamiento radiativo de -0.6 W m⁻² y -0.8 W m⁻² por efecto directo o indirecto (formación de nubes) respectivamente. En este caso las barras de error son igual o incluso más grandes que los valores estimados del forzamiento radiativo. En otras palabras, la estimación del impacto de los aerosoles sobre el clima del planeta tiene una incertidumbre mayor que la de los GEI. Por esta razón, la importancia de su estudio.

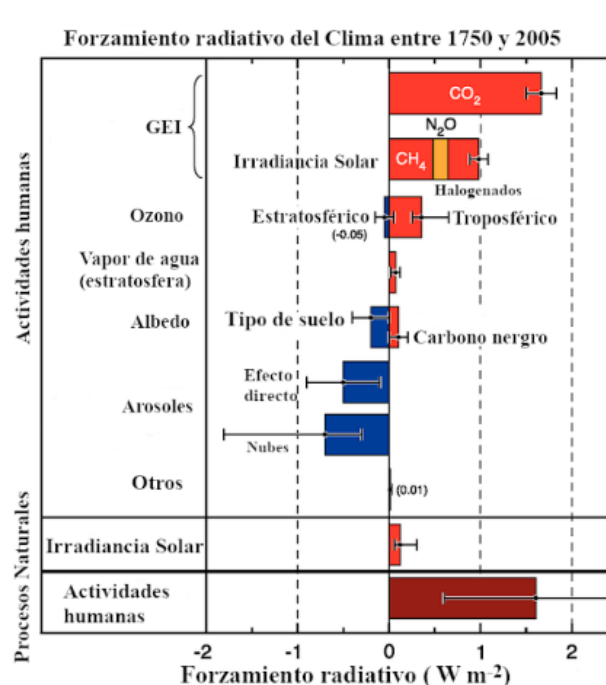


Figura 3. Resumen de los principales componentes del forzamiento radiativo del cambio climático. Los valores representan los forzamientos en 2005 en relación con el inicio de la era industrial (alrededor de 1750). Las actividades humanas provocan cambios significativos en los gases de vida prolongada, el ozono, el vapor de agua, el albedo superficial, los aerosoles y las estelas de condensación. El único aumento significativo en el forzamiento natural entre 1750 y 2005 ocurrió en la radiación solar. Los forzamientos positivos conducen al calentamiento del clima y los forzamientos negativos conducen al enfriamiento. La delgada línea negra adjunta a cada barra de color representa el rango de incertidumbre para el valor respectivo. Figura adaptada del 5º Informe del IPCC (IPCC, 2013)

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

Un experimento demostrativo sobre la formación de aerosoles.

La formación de aerosoles: las reacciones químicas del ozono y los terpenos

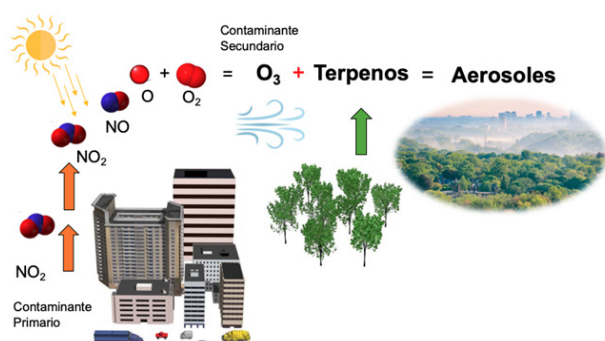
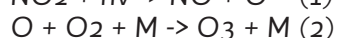


Figura 4. Mecanismo fisicoquímico para la formación de aerosoles en la interfaz de las ciudades y los bosques. Fuente: Elaboración propia.

En la atmósfera los aerosoles se pueden generar a través de la reacción química entre el ozono (O_3) y los terpenos, como se muestra en la figura 4. Primero, el O_3 se forma por procesos químicos de varios pasos que requieren luz solar. En la parte alta de la atmósfera llamada estratosfera, el proceso comienza con la ruptura de una molécula de oxígeno (O_2) por la radiación ultravioleta del sol. Sin embargo, en la parte baja de la atmósfera (troposfera), el O_3 se forma principalmente a través de un conjunto de reacciones químicas que involucran hidrocarburos y gases nitrogenados (NO_2) que son resultado de los procesos de combustión (Seinfeld & Pandis, 2016) principalmente por los automóviles y que son conocidos como contaminantes primarios. La formación del O_3 troposférico ocurre por interacción del NO_2 con la luz solar (la fotólisis) en el ultravioleta (UV) en longitudes de onda menores de 424 nm, de acuerdo al siguiente conjunto de reacciones



donde M representa un "tercer cuerpo" que puede ser una tercera molécula (N_2 o O_2) que absorbe el exceso de energía (vibración) y estabiliza la molécula de O_3 formada. La reacción (2) es una de las principales reacciones que generan O_3 en la troposfera.

De manera simultánea, los terpenos son emitidos por la vegetación y los árboles que rodean las ciudades y reaccionan químicamente con el O_3 para producir finalmente los aerosoles.

Experimento: formación de aerosoles

En el experimento propuesto en este trabajo, en vez de utilizar la energía de la luz UV del sol para la fotólisis del NO_2 , se emplea un generador de ozono (O_3) que emplea un alto voltaje para romper las moléculas de oxígeno (O_2) en el aire. Este proceso se puede representar de acuerdo a (Yagi & Tanaka, 1979)



Donde, e es un electrón que debe poseer una energía ~ 6 eV (206.6 nm) para que se pueda lograr la disociación de la molécula de oxígeno (O_2), en consecuencia, casi inmediatamente el oxígeno (O) de acuerdo con la reacción (2) produce O_3 .

Además, se emplean cítricos para generar terpenos. El olor característico de los cítricos proviene de su contenido rico en grupos de compuestos aromáticos, en particular de los llamados terpenos. Típicamente, la mayor proporción (96%) de los volátiles totales en una cáscara de naranja corresponde a un tipo de terpeno llamado monoterpeneo limoneno (Rodríguez et al., 2011). Estos terpenos en presencia del O_3 realizan procesos de nucleación hasta alcanzar niveles de concentración de partículas aproximadamente estables, produciendo aerosoles que pueden percibirse en forma de neblina. Es interesante mencionar que la reacción entre el O_3 y los terpenos no solo ocurre en la atmósfera, también se presenta en el aire ambiente de espacios cerrados, en interiores cuando se emplean productos de limpieza con aromatizantes y como consecuencia también se producen partículas (Coleman, Lunden, Destailats, & Nazaroff, 2008). Estas partículas son asociadas a contaminación del aire en interiores.

La figura 5 muestra los elementos del diseño experimental, entre ellos están una (1) bomba de aire que satura de oxígeno, el (2) generador de ozono comercial (Boelter & Davidson, 1997) y este a su vez está conectado a una (3) llave de paso que permite el paso del ozono hacia un (4) recipiente cilíndrico de acrílico. Este recipiente está sellado lo mejor posible para evitar que se escape el ozono. Finalmente, una manguera extrae aire desde el interior del recipiente cilíndrico hacia (5) un instrumento para medir particular de diámetros menores a $2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$) y $10 \mu m$ (PM_{10}) por medio de un sensor SDO11 Nova Fitness calibrado y montado en una tarjeta Arduino-UNO. Antes de comenzar la ejecución del experimento Se hace incidir un laser Helio-Neón

(He-Ne) para que atraviese el ancho del recipiente, por lo que se puede observar solo la reflexión especular del haz láser en la superficie del recipiente, y dentro del recipiente no se logra observar cómo viaja la luz debido a que en el interior solo existe aire, y moléculas de O₂

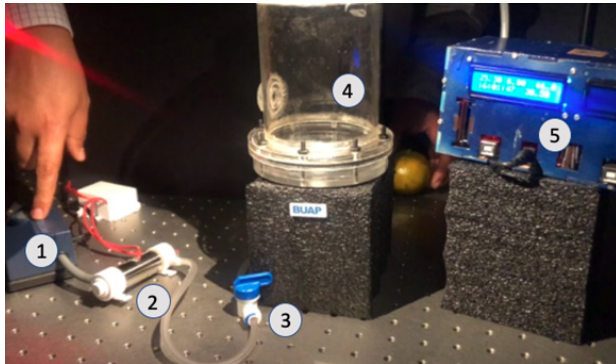


Figura 5. Configuración experimental, con los elementos (1) bomba de aire que introduce aire en el (2) generador de ozono y pasa por una (3) válvula para introducir el O₃ en el (4) recipiente cerrado. Por último, a través de una manguera se conecta un sensor de partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}). Fotografía del experimento elaborado en el Laboratorio de interferometría holográfica de la BUAP.

Hasta esta etapa del experimento hemos logrado producir O₃ e introducirlo en el recipiente, pero aún falta hacer reaccionar químicamente el O₃ con terpenos para realizar la conversión gas-partícula y generar aerosoles dentro del recipiente. Para conseguir los terpenos, masajeamos una naranja, removemos la cáscara de una naranja e introducimos rápidamente pequeñas porciones de la cáscara de la naranja en el recipiente. Es recomendable no dejar pasar mucho tiempo desde que se pela la naranja hasta que se introducen las cáscaras en el recipiente. En la mayoría de los casos, se logra observar de manera cuasi-instantánea una neblina que emana de la superficie de la piel de la cáscara de naranja y comienza a inundar el interior del recipiente. Nuevamente, se hace pasar el haz de luz láser del apuntador a través del envase, Observamos cómo viaja la luz del láser dentro del recipiente formando una línea recta y observamos fenómenos de dispersión debido a la presencia de partículas, lo cual hace evidente la presencia de aerosol dentro del recipiente, como se muestra en la figura 6(a). Asimismo, una gráfica de los datos del sensor de partículas muestra un incremento en la cantidad de partículas observado

a partir del momento en el que se depositaron las cáscaras de naranja (franja amarilla) confirmando la formación de aerosoles, ver figura 6(b). El lector interesado puede mirar la realización del experimento en YouTube

Formación de Aerosoles.

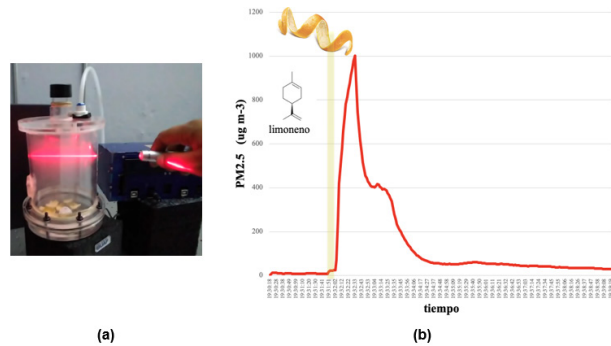


Figura 6. Muestra (a) el camino óptico del láser que se hace visible al interior del recipiente cerrado debido a la presencia de aerosoles y (b) el monitor de partículas registra un aumento en la concentración de partículas PM_{2.5}.

Conclusiones

Consideramos necesario, evidenciar a nivel universitario e interdisciplinario la importancia de los aerosoles en el clima, así como su origen y mecanismos fisicoquímicos de formación. Para ello hemos resaltado (i) algunas de las características más importantes de los aerosoles, entre ellas la de contribuir al balance radiativo de energía que incrementan la incertidumbre de los modelos del clima global, y (ii) comentamos sobre el fenómeno que ocurre entre los límites urbanos-forestales donde se presenta la formación de aerosoles a partir de las reacciones químicas de contaminantes secundarios y COV provenientes de los bosques que rodean la ciudad, y finalmente (iii) para ilustrar el punto anterior mostramos detalles sobre un experimento realizado en el laboratorio universitario para estudiar el proceso de formación de aerosoles a partir de emisiones biogénicas (terpenos) y motivar la discusión sobre la importancia de los aerosoles en diversos aspectos como el clima global, modelos de cambio climático, fenómenos de dispersión de luz y visibilidad, entre otros. Los resultados del experimento, y la realización del mismo, motiva una serie de lecturas sugeridas en este documento.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Agradecimientos

El apoyo del proyecto grupal del Programa Institucional para la Consolidación de los Cuerpos Académicos; Apoyo complementario a Proyectos de Investigación 2022 (VIEP-2022-0013) para la adquisición de materiales de este experimento. Finalmente, al Laboratorio de interferometría holográfica por las facilidades otorgadas durante la configuración del experimento.

Referencias

- Andreae, M. O., & Crutzen, P. J. (1997). Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*, 276(5315), 1052–1058. <https://doi.org/10.1126/science.276.5315.1052>
- Boelter, K. J., & Davidson, J. H. (1997). Ozone generation by indoor, electrostatic air cleaners. *Aerosol Science and Technology*, 27(6), 689–708. <https://doi.org/10.1080/02786829708965505>
- Bréon, F. M., Tanré, D., & Generoso, S. (2002). Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite. *Science*, 295(5556), 834–838. <https://doi.org/10.1126/science.1066434>
- Che, H., Xia, X., Zhu, J., Wang, H., Wang, Y., Sun, J., ... Shi, G. (2015). Aerosol optical properties under the condition of heavy haze over an urban site of Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(2), 1043–1053. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3415-5>
- Coleman, B. K., Lunden, M. M., Destailats, H., & Nazaroff, W. W. (2008). Secondary organic aerosol from ozone-initiated reactions with terpene-rich household products. *Atmospheric Environment*, 42(35), 8234–8245. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.031>
- Davidson, C. I., Phalen, R. F., & Solomon, P. A. (2005, August). Airborne particulate matter and human health: A review. *Aerosol Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/02786820500191348>
- Ehara, K., Hagwood, C., & Coakley, K. J. (1996). Novel method to classify aerosol particles according to their mass-to-charge ratio - Aerosol particle mass analyser. *Journal of Aerosol Science*, 27(2), 217–234. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)00562-5](https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00562-5)
- Gao, Y., Ma, M., Yan, F., Su, H., Wang, S., Liao, H., ... Gao, H. (2022). Impacts of biogenic emissions from urban landscapes on summer ozone and secondary organic aerosol formation in megacities. *Science of the Total Environment*, 814, 152654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152654>
- Hallquist, M., Wenger, J. C., Baltensperger, U., Rudich, Y., Simpson, D., Claeys, M., ... Wildt, J. (2009). The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: Current and emerging issues. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 5155–5236. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5155-2009>
- Haywood, J. (2016). Atmospheric Aerosols and Their Role in Climate Change. In *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth: Second Edition* (pp. 449–463). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63524-2.00027-0>
- Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Callander, B. A., Harris, N. (Neil), Katterberg, A., Maskell, K. (Kathy), ... WMO. (1996). *Climate change 1995* :, 572. Retrieved from <https://digitalibrary.un.org/record/223181>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Jia, G. (2014). Atmospheric Residence Times of the Fine-aerosol in the Region of South Italy Estimated from the Activity Concentration Ratios of $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ in Air Particulates. *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, 5(6), 1–9. <https://doi.org/10.4172/2155-9872.1000216>
- Lee, L. A., Reddington, C. L., & Carslaw, K. S. (2016). On the relationship between aerosol model uncertainty and radiative forcing uncertainty. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(21), 5820–5827. <https://doi.org/10.1073/pnas.1507050113>

Miller, R. L., & Tegen, I. (1998). Climate response to soil dust aerosols. *Journal of Climate*, 11(12), 3247–3267. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<3247:CRTSDA>2.o.CO2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<3247:CRTSDA>2.o.CO2)

Pöschl, U. (2005, November 25). Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie - International Edition*. <https://doi.org/10.1002/anie.200501122>

Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D. (2001). Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science (New York, N.Y.)*, 294(5549), 2119–2124. <https://doi.org/10.1126/science.1064034>

Riemer, N., & Ault, A. (2019). The Diversity and Complexity of Atmospheric Aerosol. *Eos*, 100. <https://doi.org/10.1029/2019e0124333>

Rodríguez, A., Andrés, V. S., Cervera, M., Redondo, A., Alquézar, B., Shimada, T., ... Peña, L. (2011). The monoterpene limonene in orange peels attracts pests and microorganisms. *Plant Signaling and Behavior*, 6(11), 1820–1823. <https://doi.org/10.4161/psb.6.11.16980>

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd Edition | Wiley (3rd Editio). NY Wiley & Sons. Retrieved from <https://www.wiley.com/en-us/Atmospheric+Chemistry+and+Physics%3A+From+Air+Pollution+to+Climate+Change%2C+3rd+Edition-p-9781118947401>

Surratt, J. D., Murphy, S. M., Kroll, J. H., Ng, N. L., Hildebrandt, L., Sorooshian, A., ... Seinfeld, J. H. (2006). Chemical composition of secondary organic aerosol formed from the photooxidation of isoprene. *Journal of Physical Chemistry A*, 110(31), 9665–9690. <https://doi.org/10.1021/jp061734m>

Yagi, S., & Tanaka, M. (1979). Mechanism of ozone generation in air-fed ozonisers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 12(9), 1509–1520. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/12/9/013>